

Санкт-Петербургский государственный университет

Математическое обеспечение и администрирование
информационных систем

Системное программирование

Калитеевский Василий Николаевич

Инверсная кинематика в задаче
управления сверхлёгким БПЛА с
дополнительным бортовым управляющим
микрокомпьютером

Магистерская диссертация

Научный руководитель:
д. ф.-м. н., профессор Терехов А. Н.

Рецензент:
генеральный директор ООО "Смыслолёт",
к. ф.-м. н. Амелин К. С.

Санкт-Петербург
2017

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Software and Administration of Information Systems

System Programming

Vasiliy Kaliteevskiy

Inverse kinematics in ultralight UAV control
problem with additional on-board
microcomputer

Master's Thesis

Scientific supervisor:
Doctor of Physics and Mathematics,
Professor Andrey Terekhov

Reviewer:
SmartFly LLC, CEO
Konstantin Amelin

Saint-Petersburg
2017

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| 1. Постановка задачи | 7 |
| 2. Литературный обзор | 8 |
| 2.1. Применение БПЛА | 8 |
| 2.2. Системы отсчета | 9 |
| 2.3. Кинематика и динамика | 14 |
| 2.4. Силы и моменты | 15 |
| 2.5. Линеаризация | 16 |
| 2.6. Полетный контроллер ArduPilot | 17 |
| 3. Модуль управления | 18 |
| 4. Модель полёта | 20 |
| 5. Реализация | 23 |
| 6. Тестирование и анализ | 25 |
| Заключение | 27 |
| Список литературы | 28 |

Введение

Беспилотные летательные аппараты играют все более заметную роль в военно-оборонительных целях. БПЛА успешно решают задачи разведки, наблюдения и коммуникации в том числе в экстремальных условиях и длительных полетах [2]. В последнее время БПЛА также успешно применяются для решения многих гражданских задач, предоставляя широкие возможности службам по чрезвычайным ситуациям (предупреждения о стихийных бедствиях, контроль пожарной безопасности), пограничным службам (патрулирование зон), предприятиям сельского хозяйства, службам охраны, средствам массовой информации, а также в других областях [1].

В мире представлено огромное количество различных БПЛА, отличающихся по своим спецификациям и набору характеристик (назначение, вес, размер, продолжительность полета и высота полета, система запуска и приземления, наличие систем автопилотирования и навигации, формат аэрофото и видеосъемки) [2].

Хорошо подобранные аппаратная и программная части являются залогом успешного выполнения описанных задач. Поэтому необходимо максимизировать собственные возможности БПЛА, что включает в себя как подбор качественных аппаратных решений, рассчитанных на возможные экстремальные условия и повышенные нагрузки, так и программную часть, обеспечивающую стабильное бесперебойное управление БПЛА в условиях зашумленности и задержек со стороны датчиков. Управляющий модуль также должен быть оптимизирован с точки зрения энергопотребления, так как БПЛА имеют ограниченный запас энергии из-за того, что вес аккумуляторных батарей сказывается на летных характеристиках аппарата [12].

Проблема заключается в том, что от показаний датчиков до принятия решения блоком управления БПЛА нужно выполнить большое количество преобразований и вычислений. При этом блок управления должен эффективно работать в режиме реального времени, поэтому эти вычисления нужно проводить оптимальным образом. Для дости-

жения этой цели при проектировании физики полета БПЛА необходимо рассмотреть ряд проблем. Во-первых, модель БПЛА необходимо рассматривать в различных системах координат, что заставляет постоянно использовать пространственные математические преобразования. Это связано, например, с тем, что классическая система уравнений движения рассматривается в инерциальных системах отсчета, то есть в системе отчета земли, однако само движение проще описывается относительно положения тела беспилотника, то есть в постоянно меняющейся системе координат летящего БПЛА. Во-вторых, различные силы и моменты, которые действуют на БПЛА, также описываются в системе координат БПЛА, в то время как имеющиеся датчики лишь частично дают показания в этой системе координат. Так, например, датчики ГЛОНАСС/GPS дают показания в системе координат Земли. Для того, чтобы иметь возможность обрабатывать показания всех датчиков, нужно рассматривать все необходимые системы координат и уметь с помощью математических преобразований переходить от одной системы координат к другой. В-третьих, нетривиальной задачей является описание кинематики и динамики процесса полета. Для описания движения БПЛА с шестью степенями свободы понадобится 12 различных переменных, описывающих координаты, скорость, углы и угловые моменты беспилотника в рамках нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих физику полета БПЛА [2].

Также необходимо рассмотреть все силы и моменты, которые действуют на БПЛА во время движения. Стоит заметить, что сюда входит и ветер, который в случае с малыми беспилотными летательными аппаратами играет очень существенную роль. Причем входит сюда как постоянный ветер, имеющийся в каком-то месте в какое-то время, так и отдельные порывы ветра, которые необходимо учитывать [12]. Также стоит отметить, что силы и моменты сил, действующих на БПЛА сильно зависят от характеристик самого БПЛА, что тоже надо учитывать. Это как площадь поверхности и форма крыла, так и факт наличия или отсутствия у БПЛА оперения [11].

Для эффективности работы управляющего модуля производится

линеаризация дифференциальных уравнений. Таким образом, все силы и моменты действующие на БПЛА будут рассматриваться как продольные и боковые, что сильно упрощает понимание процесса полета, а также взаимодействие с ним с помощью автопилота.

Модуль управления в свою очередь, состоит из следующих модулей: Path Planner, Path Manager, Path Follower, Autopilot. Модуль Path Planner задает точки, через которые планируется полет БПЛА. Модуль Path Manager преобразует последовательность этих точек в последовательность линий и дуг Дубина [11], как части траектории по которой планируется полет БПЛА. Далее по ходу следования пути уже сам автопилот отслеживает прохождение БПЛА по этому пути, внося корректировки по ходу следования и передавая команды на все доступные для обеспечения следования пути средства, такие как двигатель, элероны, рули и пр.

В качестве завершающей части нужно подготовить аппаратную составляющую, в качестве которой был выбран микроконтроллер ТРИК вместе с автопилотом ArduPilot, однако прежде чем начинать реализацию на реальном микроконтроллере систему надо протестировать. Для этой цели используется имитационная среда Simulink в пакете прикладных программ Matlab [6].

1. Постановка задачи

Целью данной магистерской работы является разработка программно-аппаратного модуля для автоматического пилотирования БПЛА. Для достижения этой цели были сформулированы следующие задачи.

1. Изучение физической составляющей процесса полета сверхлегких БПЛА.
2. Создание архитектуры программного-аппаратного модуля управления БПЛА.
3. Разработка модели на основе изученных алгоритмов на базе созданной архитектуры.
4. Реализация модуля.
5. Тестирование модуля.

2. Литературный обзор

2.1. Применение БПЛА

Беспилотные авиационные системы (UAS) все чаще встречаются в оборонных программах и оборонной стратегии во всем мире. Технологические достижения позволили создать как крупные беспилотные летательные аппараты (например, Global Hawk, Predator), так и более компактные беспилотные летательные аппараты большей мощности (например, Wasp, Nighthawk). Как показали недавние конфликты, имеется множество военных применений для беспилотных летательных аппаратов, включая разведку, наблюдение, оценку ущерба от боевых действий и коммуникации [2].

Гражданское применение БПЛА не так развито, хотя их потенциал очень велик. Они могут осуществлять мониторинг окружающей среды, мониторинг лесных пожаров, осуществлять пограничный патруль, наблюдать за воздушной почвой и заниматься картографированием, мониторингом движения, точечным сельским хозяйством, оказывать помощь в случае стихийных бедствий, образовывать специальные сети связи и осуществлять поисково-спасательные службы в сельских районах [13]. Для того чтобы успешно выполнять эти задачи, надежность таких систем должна возрасти, их возможности должны быть расширены, легкость эксплуатации должна увеличиваться, а стоимость должна уменьшаться [3].

Терминология беспилотной авиационной системы относится не только к самолету, но и ко всему вспомогательному оборудованию, используемому в системе, включая датчики, микроконтроллеры, программное обеспечение, наземные станции, пользовательские интерфейсы и аппаратуру связи. Беспилотные летательные аппараты (UA) обычно можно разделить на две категории: самолеты и винтокрылые летательные аппараты [3]. Оба типа самолетов имеют отличительные характеристики, которые затрудняют проектирование автономного поведения. Классификация "сверхлёгкий БПЛА" используется для обозначения класса са-

молетов с размахом крыла от 1 до 3 метров. Небольшие беспилотные летательные аппараты обычно работают на топливе и, как правило, требуют взлетно-посадочную полосу для взлета и посадки, хотя некоторые используют катапульту для взлета и скользящий подъемник для посадки, но таких примеров довольно мало. Сверхлёгкие летательные аппараты обычно рассчитаны на работу от 10 до 12 часов при полезной нагрузке от 5 до 25 кг [2].

2.2. Системы отсчета

Предлагается реализовать собственный автопилот с целью получить кастомизируемое, масштабируемое программное обеспечение, с помощью которого можно в дальнейшем внедрять различные инновационные решения, а также тестировать различные математические идеи и гипотезы.

Прежде чем приступить к самой физике полета, включая основной набор сил и моментов действующих на БПЛА, надо задать различные необходимые системы отсчета, которые будут в дальнейшем использоваться при вычислении физики полёта. Это связано с рядом следующих причин.

1. Классическое уравнение движения Ньютона описывается в фиксированной, инерциальной системе отсчета. Однако, его проще описать в системе отсчета БПЛА.
2. Аэродинамические силы и моменты, действующие на тело БПЛА проще описываются в системе отсчета самого БПЛА.
3. Бортовые датчики, такие как акселерометр и гироскоп выдают значения относительно положения тела в пространстве, то есть в системе отсчета БПЛА, тогда так датчики GPS / ГЛОНАСС выдают значения в системе координат Земли.
4. Траектория полета БПЛА, как и набор точек для следования также задаются в системе отсчета Земли.

Основные используемые системы отсчета (рис. 1):

1. Базовая инерциальная система отсчета (inertial frame) . Система отсчета Земли. F^i
2. Система отсчета БПЛА (vehicle frame). F^v . Достигается с помощью сдвига относительно F^i .
3. Система отсчета БПЛА с отклонением по горизонтальному направлению (vehicle-1 frame). F^{v1} . Достигается с помощью поворота, относительно F^v на угол ψ .
4. Система отсчета БПЛА с отклонением по горизонтальному и вертикальному направлению (vehicle-2 frame). F^{v2} . Достигается с помощью поворота, относительно F^{v1} на угол θ .
5. Система отсчета БПЛА с отклонением по горизонтальному, вертикальному направлению, а также с помощью поворота относительно направляющей оси (body frame). F^b . Достигается с помощью поворота, относительно F^{v2} на угол ϕ .
6. Система отсчета БПЛА, повернутая на угол атаки (stability frame). F^s . Достигается путем поворота относительно F^b на угол α .
7. Система отсчета БПЛА, повернутая на угол сноса ветром (wind frame). F^w . Достигается путем поворота относительно F^s на угол β .

Матрица поворота на некоторый угол ν в общем виде выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \cos(\nu) & \sin(\nu) & 0 \\ -\sin(\nu) & \cos(\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для того, чтобы делать преобразования между системой отсчета Земли F^i и системой отсчета БПЛА F^b нужно перемножить все промежуточные матрицы. Тогда матрица перевода будет выглядеть следующим образом:

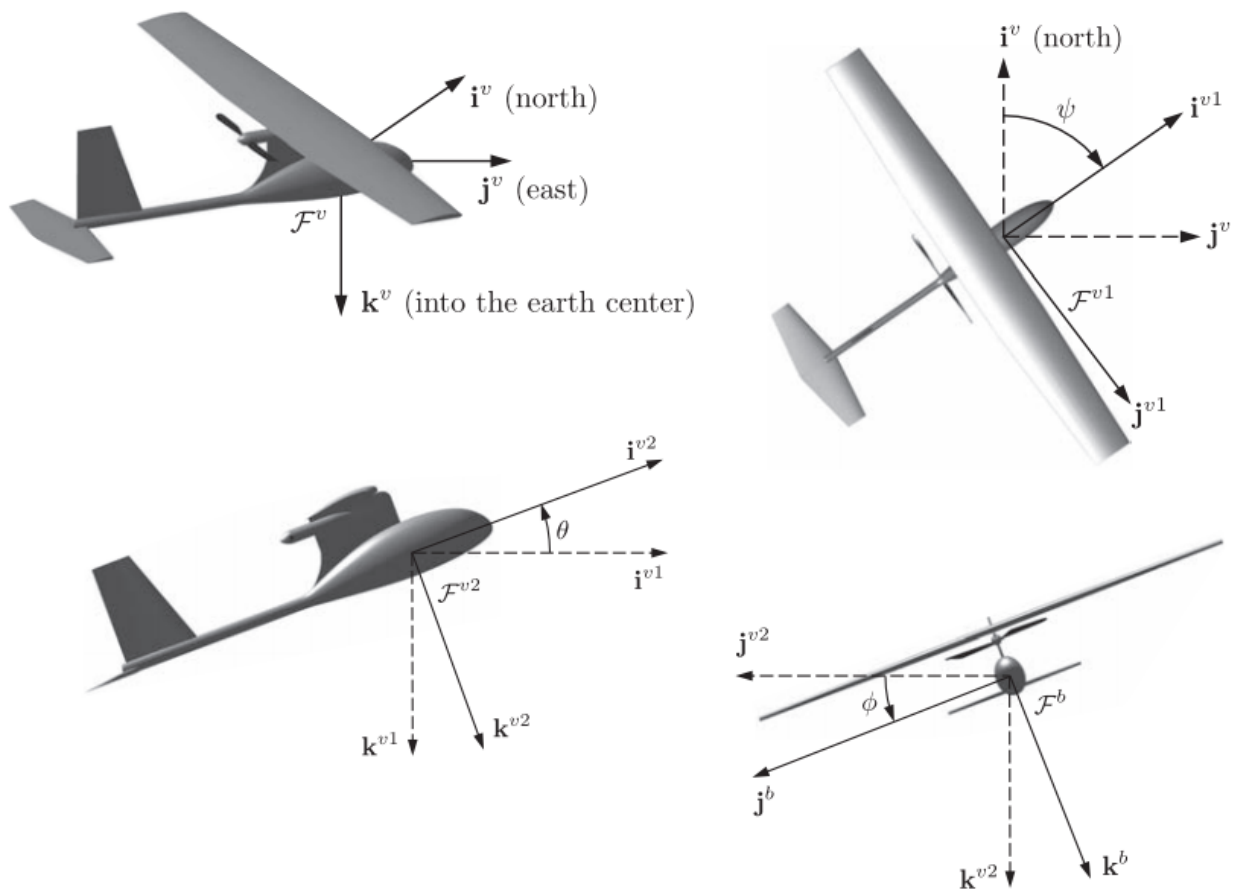


Рис. 1: Различные системы отсчета.

$$R_v^b(\phi, \theta, \psi) = R_{v2}^b(\phi) R_{v1}^{v2}(\theta) R_v^{v1}(\psi) =$$

$$\begin{pmatrix} C(\theta)C(\psi) & C(\theta)S(\psi) & -S(\theta) \\ S(\phi)S(\theta)C(\psi) - C(\phi)S(\psi) & S(\phi)S(\theta)S(\psi) + C(\phi)C(\psi) & S(\phi)C(\theta) \\ C(\phi)S(\theta)C(\psi) + S(\phi)S(\psi) & C(\phi)S(\theta)S(\psi) - S(\phi)C(\psi) & C(\phi)C(\theta) \end{pmatrix},$$

где $C() = \cos()$, а $S() = \sin()$.

Одна из целей готового автопилота заключается в том, чтобы по полученной координате точки, автопилот смог привести БПЛА в эту точку с помощью соответствующих средств управления (элеронами, рулями и пр.), то есть смог бы правильно направлять вектор скорости БПЛА[7]. Так как координата точки указывается в системе отсчета земли первое что нужно сделать это научиться представлять вектор скорости БПЛА в системе отсчета земли. [8]

Допустим БПЛА движется в системе отсчета \mathcal{F}^b относительно земли (системы отсчета \mathcal{F}^i) как показано на рис. 2. В этом случае вектор скорости \mathbf{p} представляется как [2]:

$$\mathbf{p} = p_x \mathbf{i}^b + p_y \mathbf{j}^b + p_z \mathbf{k}^b.$$

То есть движение во времени можно задать формулой [2]:

$$\frac{d}{dt_b} \mathbf{p} = \dot{p}_x \mathbf{i}^b + \dot{p}_y \mathbf{j}^b + \dot{p}_z \mathbf{k}^b.$$

Тогда смещение вектора \mathbf{p} в системе отсчета \mathcal{F}^b относительно системы отсчета \mathcal{F}^i будет задаваться формулой:

$$\frac{d}{dt_i} \mathbf{p} = \dot{p}_x \mathbf{i}^b + \dot{p}_y \mathbf{j}^b + \dot{p}_z \mathbf{k}^b + p_x \frac{d}{dt_i} \mathbf{i}^b + p_y \frac{d}{dt_i} \mathbf{j}^b + p_z \frac{d}{dt_i} \mathbf{k}^b.$$

Если представить вращение (угловую скорость) \mathcal{F}^b относительно \mathcal{F}^i как $\omega_{b/i}$, тогда приращения вектора по каждому из направлений можно представить, как:

$$\dot{\mathbf{i}}^b = \omega_{b/i} \times \mathbf{i}^b$$

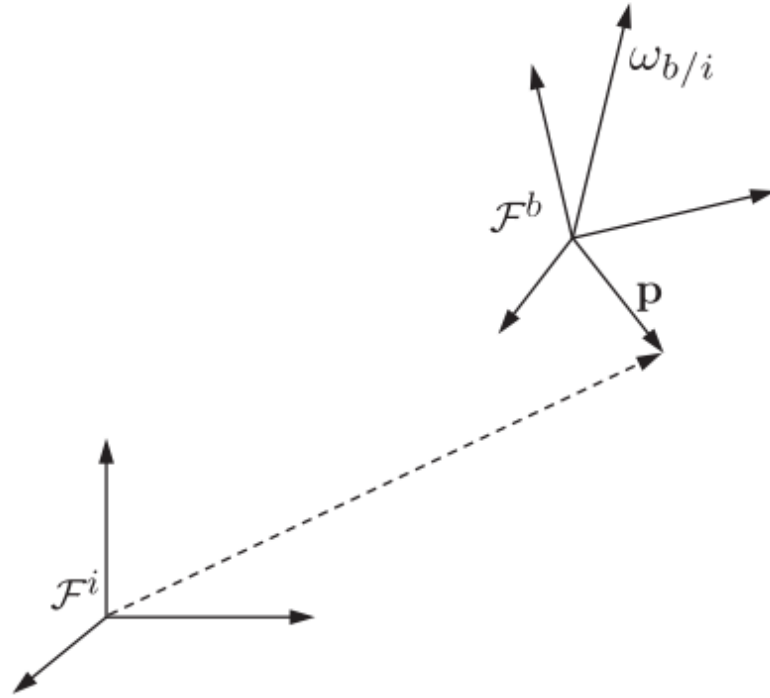


Рис. 2: Вектора сил в различных проекциях.

$$\dot{j}^b = \omega_{b/i} \times \mathbf{j}^b$$

$$\dot{k}^b = \omega_{b/i} \times \mathbf{k}^b$$

И если подставить в предыдущее уравнение, то получится:

$$p_x^b + p_y^b + p_z^b = p_x(\omega_{b/i} \mathbf{i}^b) + p_y(\omega_{b/i} \mathbf{j}^b) + p_z(\omega_{b/i} \mathbf{k}^b) = \omega_{b/i} \times \mathbf{p}$$

И наконец, если подвести все вышеизложенное под одну черту, то мы получим мгновенную скорость БПЛА выраженную через систему координат земли:

$$\frac{d}{dt_i} \mathbf{p} = \frac{d}{dt_b} \mathbf{p} + \omega_{b/i} \times \mathbf{p}$$

2.3. Кинематика и динамика

Движение беспилотного летательного аппарата в пространстве, имеющего 6 степеней свобод, описывается с помощью двенадцати переменных, показанных в таблице:

| Название | Описание |
|----------|---|
| p_n | Координата БПЛА по оси на север в F^i |
| p_e | Координата БПЛА по оси на восток в F^i |
| p_d | Координата БПЛА по оси направленной в центр Земли в F^i |
| u | Скорость вдоль оси $i^b F^b$ |
| v | Скорость вдоль оси $j^b F^b$ |
| w | Скорость вдоль оси $k^b F^b$ |
| ϕ | Угол крена, заданный в F^{v2} |
| θ | Угол тангажа, заданный в F^{v1} |
| ψ | Угол рысканья, заданный в F^v |
| p | Угловая скорость крена |
| q | Угловая скорость тангажа |
| r | Угловая скорость рысканья |

Формулы перерасчета этих переменных для летящего БПЛА можно найти в следующих книгах по механике[4], пространственной динамике[11], динамике полета[9], робототехнике[10].

$$\begin{pmatrix} \dot{p}_n \\ \dot{p}_e \\ \dot{p}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(\theta)C(\psi) & S(\phi)S(\theta)C(\psi) - C(\phi)S(\psi) & C(\phi)S(\theta)C(\psi) + S(\phi)S(\psi) \\ C(\theta)S(\psi) & S(\phi)S(\theta)S(\psi) + C(\phi)C(\psi) & C(\phi)S(\theta)S(\psi) - S(\phi)C(\psi) \\ -S(\theta) & S(\phi)C(\theta) & C(\phi)C(\theta) \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{u}_n \\ \dot{u}_e \\ \dot{u}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} rv - qw \\ pw - ru \\ qu - pv \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Gamma_1 pq - \Gamma_2 qr \\ \Gamma_5 pr - \Gamma_6(p^2 - r^2) \\ \Gamma_7 pq - \Gamma_1 qr \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Gamma_3 l + \Gamma_4 n \\ \frac{1}{J_y} m \\ \Gamma_4 l + \Gamma_8 n \end{pmatrix}.$$

2.4. Силы и моменты

В момент полета БПЛА подвергается нетривиальному воздействию различных сил и моментов разных природ, а именно гравитационной (f_g), аэродинамической (f_a , m_a) и движущей (f_p , m_p). Тогда суммарное действие сил и моментов на БПЛА можно описать формулами [2]:

$$f = f_g + f_a + f_p$$

$$m = m_a + m_p.$$

Сила гравитации в инерциальной системе координат описывается простым вектором:

$$f_g^v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix}.$$

В системе координат тела БПЛА:

$$f_b^v = \begin{pmatrix} -mg * \sin(\theta) \\ mg * \cos(\theta) \sin(\phi) \\ mg * \cos(\theta) \cos(\phi) \end{pmatrix}.$$

Когда самолет летит по воздуху он генерирует своими крыльями силу подъема и силу торможения, как показано на Рис. 3. Сила и распределение давления действующего на самолет зависит от скорости по воздуху, плотности воздуха, формы и положения самолета в воздухе.

Так, динамическое давление описывается формулой $\frac{1}{2}V_a^2$, где ρ - плотность воздуха, а V_a - скорость самолета относительно воздуха.

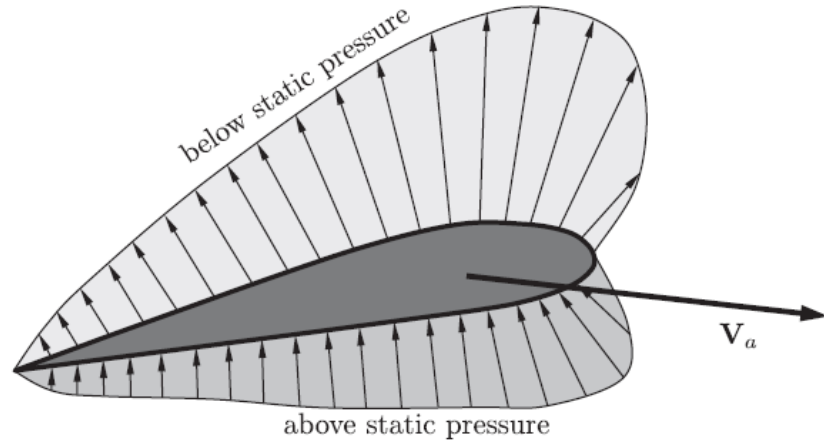


Рис. 3: Распределение плотности воздуха вокруг крыла во время полета.

Сила торможения, сила подъема, и момент сил обычно описываются следующими формулами [11]:

$$F_{lift} = \frac{1}{2}V_a^2 S C_L$$

$$F_{drag} = \frac{1}{2}V_a^2 S C_D$$

$$m = \frac{1}{2}V_a^2 S c C_m,$$

где C_L , C_D , C_m - безразмерные величины, характеризующие аэродинамические коэффициенты, S - площадь поверхности крыла, c - величина, равная половине крыла.

2.5. Линеаризация

Как было показано выше, уравнения движения БПЛА представляют собой довольно сложный набор из 12 нелинейных, дифференциальных уравнений первого порядка. Из-за их сложности проектирование контроллеров на их основе затруднено и требует более простых подходов.

Динамику для самолетов можно приблизительно разложить на продольное движение, которое включает в себя скорость относительно воздуха, угол тангажа и высоту и в поперечное движение, которое включает в себя углы крена и направления. Несмотря на то, что существует связь между продольным и поперечным движением, для большинства БПЛА она достаточно мала, и её нежелательные эффекты можно смягчить с помощью алгоритмов управления, предназначенных для подавления помех.

Линеаризация 12 основных уравнений, описывающих полёт БПЛА хорошо продемонстрирована в [2], и здесь приведена не будет в силу избыточной сложности.

2.6. Полетный контроллер ArduPilot

Популярным используемым решением для автопилотирования БПЛА является полетный контроллер ArduPilot. Этот продукт является полноценным решением БПЛА, который позволяет помимо радиоуправляемого дистанционного пилотирования - автоматическое управление по заранее созданному маршруту, то есть полет по точкам, а так же обладает двухсторонней передачей телеметрических данных с борта на наземную станцию. Он разрабатывается сообществом DIY Drones и базируется на проекте с открытым исходным кодом Arduino.

Полетный контроллер обладает хорошими преимуществами:

- низкая цена;
- возможность установить до 166 полетных точек;
- редактирование маршрута в полете;
- беспроводная конфигурация настроек;
- поддержка различных рам и форм БПЛА;
- поддержка авиасимулятора через ПО Mission Planner.

3. Модуль управления

Модуль управления работает по принципу изображенному на 4. Модуль Path Planner задает точки, через которые планируется полет БПЛА. Модуль Path Manager преобразует последовательность этих точек в последовательность линий и дуг Дубина, как части траектории по которой планируется полет БПЛА. Далее по ходу следования пути(Path Following) уже сам атопилот отслеживает прохождение БПЛА по этому пути, внося корректировки по ходу следования и передавая команды на все доступные для обеспечения следования пути средства, такие как двигатель, элероны, рули и пр.

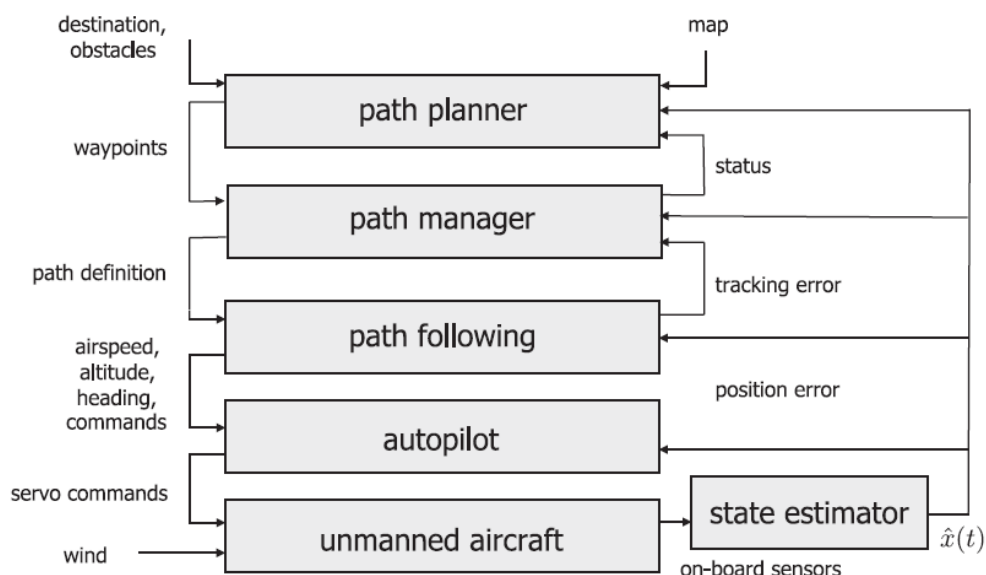


Рис. 4: Системная архитектура модуля управления БПЛА.

Для планирования пути есть два класса проблем. Первый это алгоритмы point-to-point, цель которых заставить БПЛА пролететь через все заданные точки, минуя препятствия. Второй класс проблем представляют из себя алгоритмы покрытия заданного региона с помощью БПЛА. Например, для аэрофотосъемки. Мы остановимся только на первом классе, рассматривая point-to-point алгоритмы.

Так как модуль управления должен учитывать погрешности и ошибки, которые поступают вместе с показаниями датчиков, то для этого су-

существует модуль State estimator, которые эти самые ошибки оценивает и вносит соответствующие коррективы.

4. Модель полёта

Прежде чем внедрять предложенную архитектуру на БПЛА, была смоделирована система апробации полета БПЛА в среде Simulink пакета прикладных программ Matlab. Matlab/Simulink это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы.

Среда очень удобна тем, что позволяет программировать дифференциальные уравнения с помощью встроенных S-функций [6]. Рисует положение БПЛА в режиме реального времени, как показано на рис. 5. По ходу следования БПЛА своему маршруту Simulink в каждый момент времени отображает все параметры всех заданных физических величин и наглядно позволяет проверить корректность работы, а также анализировать физику движения БПЛА. Такой вывод показан на рис. 6. Позволяет задавать сложную структуру взаимодействия модулей. Основная блок-диаграмма, которая показана на рис. 7 содержит в себе также модули: `navDynamics`, отвечающий за кинематику и динамику процесса движения, `forcesMoments`, отвечающий за перерасчет сил и моментов, `drawAircraft` - за отображение БПЛА в графической среде.

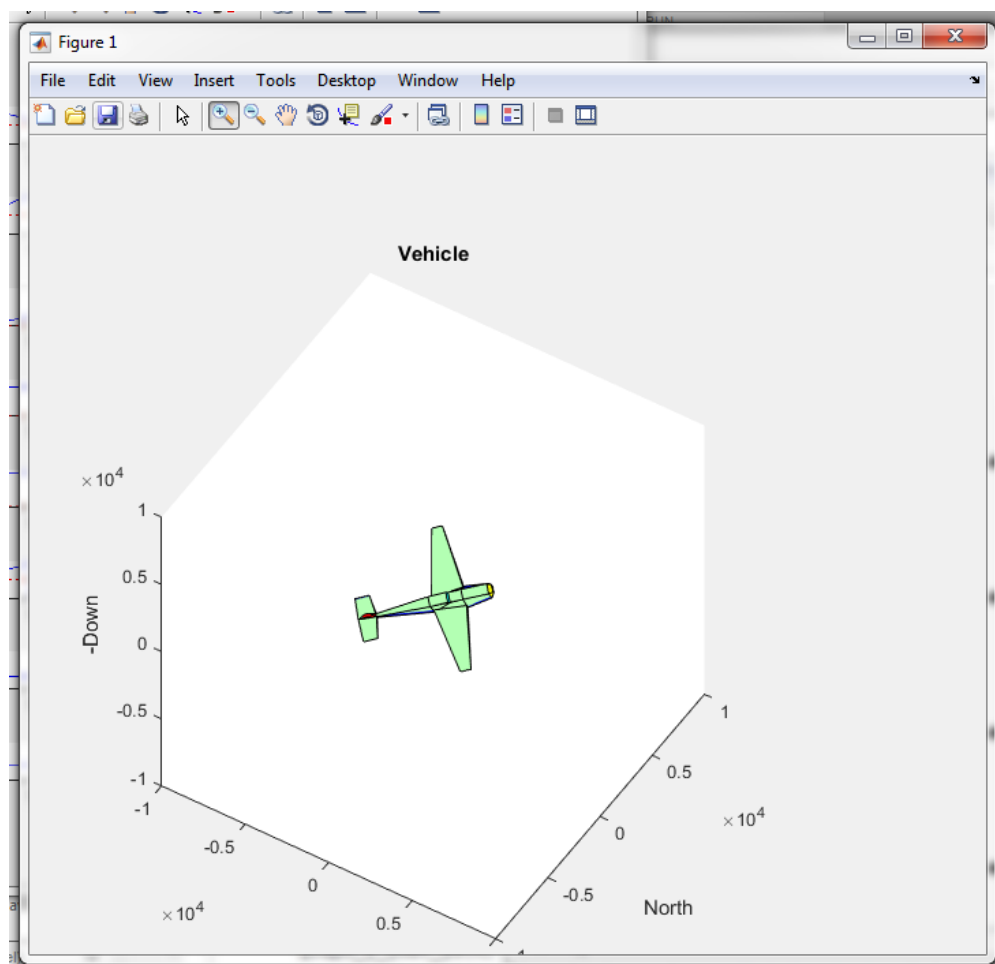


Рис. 5: Отображение модели БПЛА в режиме реального времени.

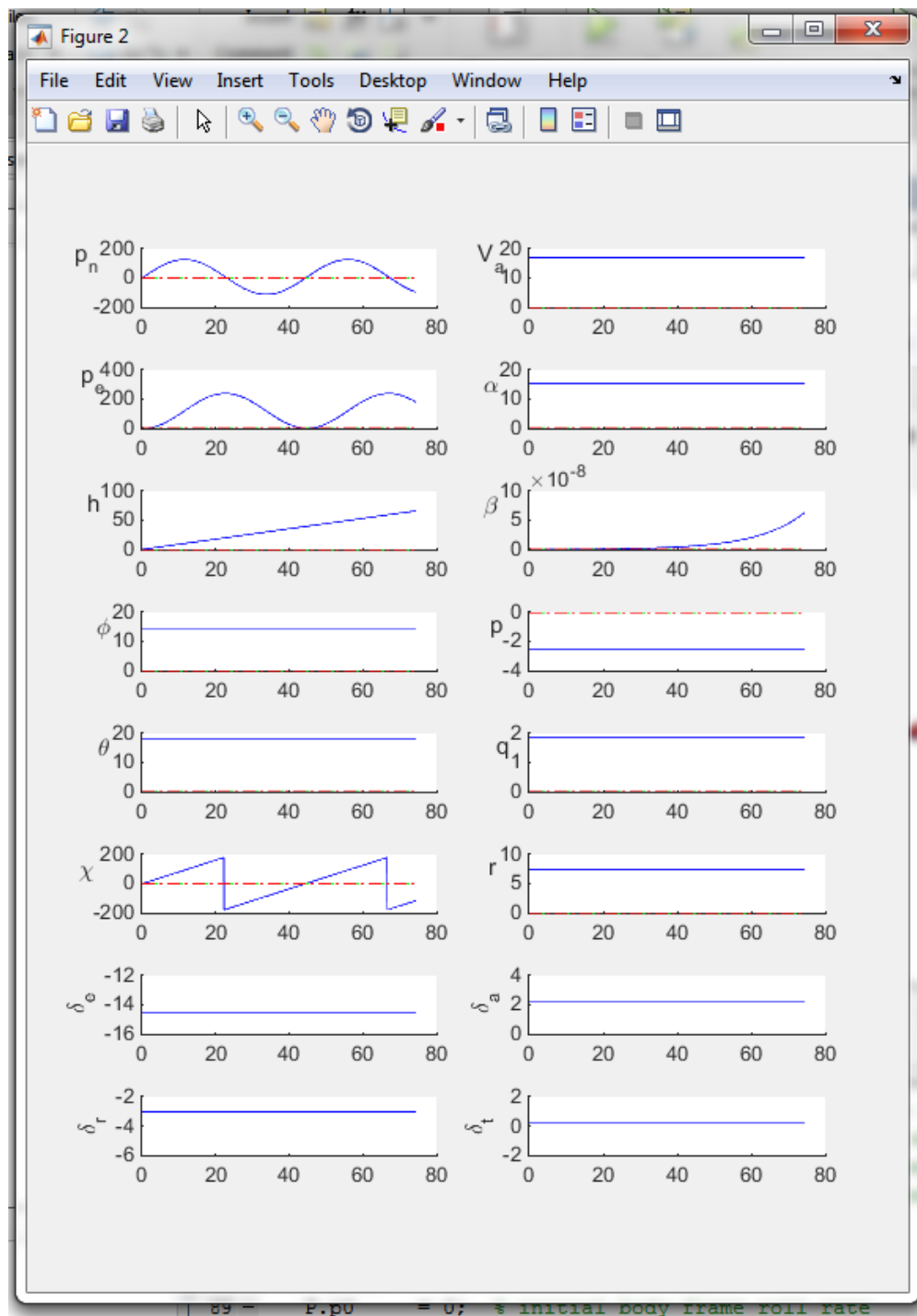


Рис. 6: Matlab/Simulink показывает все заданные параметры движения в режиме реального времени.

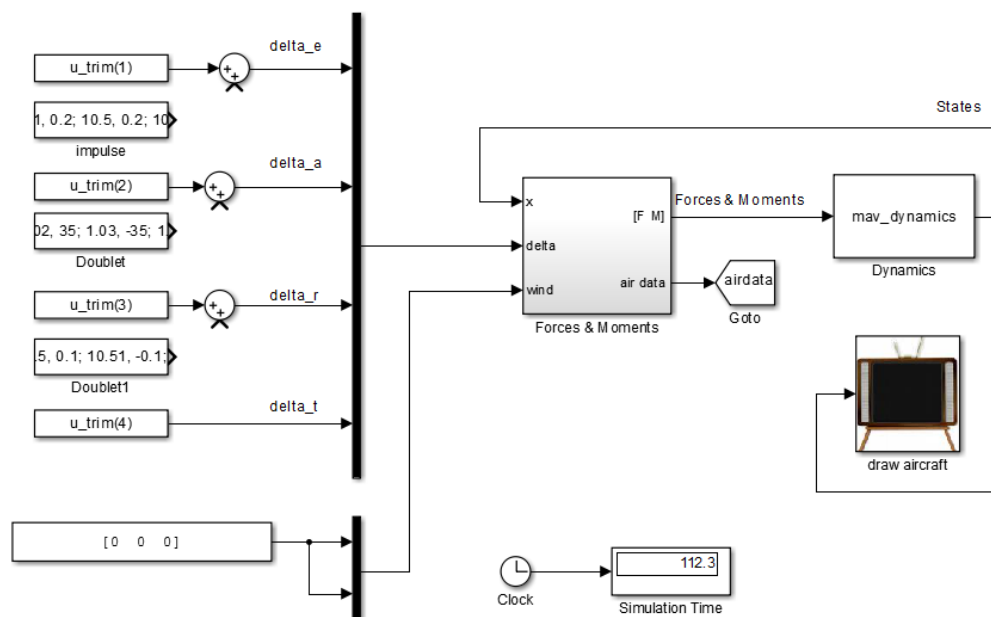


Рис. 7: Главная составляющая тестового модуля, представляющая из себя блок-диаграмму в виде направленных графов.

5. Реализация

Реализация автопилота будет совершена на платформе ТРИК, изображенной на Рис. 8.

ТРИК — это миникомпьютер, совместимый с широким спектром периферийных устройств, содержащий все необходимое оборудование для создания на его базе автономных робототехнических систем. Контроллер может управлять двигателями прямого тока и сервоприводами, обрабатывать информацию как с цифровых датчиков, так и с аналоговых, работать с видео модулями и микрофонами, имеет интерфейсы Wi-Fi, Bluetooth 4.0 (включая LE), USB, Micro-SD и ANT. В контроллере установлены встроенные защиты от перегрузки по току и от глубокой разрядки аккумулятора.[14]

ТРИК разработан на базе процессора OMAP-L138 C6-Integra™ DSP + ARM® SoC [5] производства Texas Instruments. Процессор имеет высокоуровневую архитектуру, изображенную на рис. 9. Этот процессор имеет два вычислительных модуля:

1. управляющее ядро ARM (ARM926EJ-S™ RISC MPU), обеспечива-

- ющее работу операционной системы Linux на контроллере;
2. ядро DSP (C674x Fixed/Floating-Point VLIW DSP) специально разработанное для обработки большого объема данных, представляемых в виде векторов.



Рис. 8: Примеры плат ТРИК.

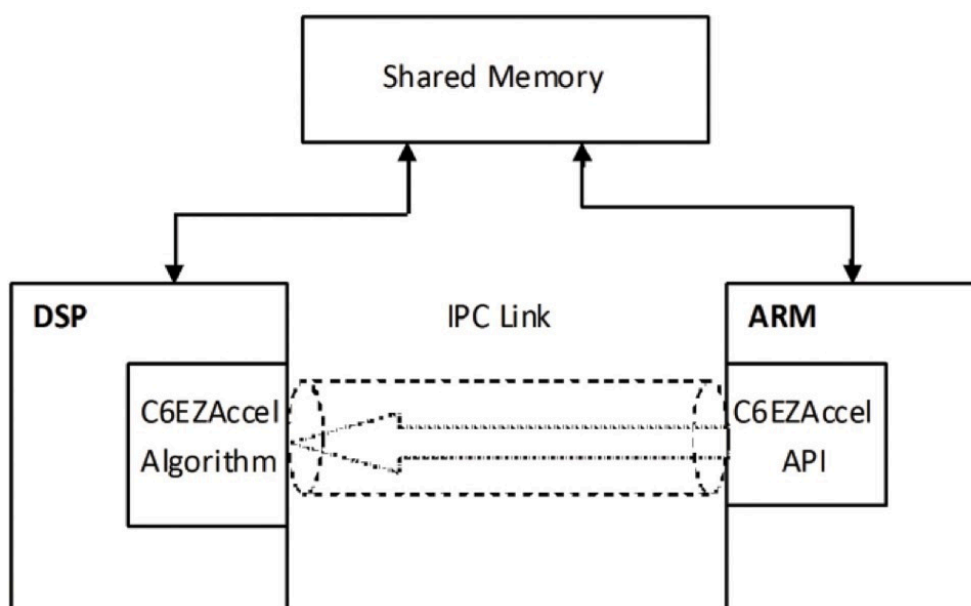


Рис. 9: Высокоуровневая архитектура процессора OMAP L138 (ARM+DSP)

6. Тестирование и анализ

Для тестирования полученного решения использовался полетный контроллер ArduPilot. Особенность контроллера заключается в том, что помимо радиоуправляемого дистанционного пилотирования, контроллер может как лететь по заранее созданному маршруту (т.е. по точкам), так и принимать команды от управляющего микрокомпьютера во время полета. Причем, контроллер имеет возможность смены режима во время полёта, что особенно важно для тестирования [13]. Контроллер обладает возможностью двухсторонней передачи телеметрических данных с борта на наземную станцию и ведение журнала во встроенную память.

Контроллер ArduPilot применялся в тестировании как средство стабилизации БПЛА в воздухе в то время, как основную функциональность автопилота — следование по прямой и умение войти в поворот по оптимальной траектории, выполнял модуль управления. Для этого БПЛА поднимался в воздух, с дистанционного управления выходил на определенную высоту, затем переходил в режим управления с микрокомпьютера. Далее основной модуль программного обеспечения БПЛА выполнял свою миссию полёта по нескольким точкам. Для этого по построенной траектории, микрокомпьютер должен был подавать управляющие сигналы на контроллер, который самостоятельно борется с различными помехами и уже обработанный управляющий сигнал передает непосредственно на рули БПЛА. Микрокомпьютер получает телеметрию во время полета и в режиме реального времени подстраивается под внешние условия и, тем самым, постоянно корректирует траекторию следования. Затем после окончания выполнения маневров, автопилот переходит в режим ручного управления для осуществления посадки.

Выполненный эксперимент показывает возможность полученного решения для использования в качестве управляющего модуля полётом БПЛА. В качестве дальнейшего усовершенствования возможна разработка в направлении независимого самостоятельного полётного кон-

троллера, платформы тестирования различных научных теорий по шумопадавлению, фильтрации сигналов и проверки различных гипотез [1] по эффективности и оптимизации управления БПЛА.

Заключение

В результате проделанной работы разработан программно-аппаратный комплекс для автоматического пилотирования БПЛА. Для достижения этой цели, были решены следующие задачи:

1. изучена физическая составляющая процесса полета сверхлегких БПЛА;
2. спроектирована архитектура модуля управления БПЛА;
3. разработана модель поведения алгоритма управления БПЛА на базе MatLab/SimuLink;
4. выполнена реализация программно-аппаратного модуля;
5. выполнена апробация созданных средств.

Также полученная система является хорошей платформой для тестирования идей и гипотез для БПЛА, моделирования математических процессов.

Список литературы

- [1] Amelin K. Tyushev K., V. Kaliteevskii. Communication and maintaining of data integrity method for decentralized network of autonomous group of mobile robots // Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2016 International Conference on / IEEE. — 2016. — P. 372–377.
- [2] Beard Randal W, McLain Timothy W. Small unmanned aircraft: Theory and practice. — Princeton university press, 2012.
- [3] Crouch Collier Craig. Integration of mini-UAVs at the tactical operations level implications of operations, implementation, and information sharing : Ph. D. thesis / Collier Craig Crouch ; Monterey California. Naval Postgraduate School. — 2005.
- [4] Goldstein Herbert. Classical mechanics. — Pearson Education India, 2011.
- [5] Instruments Texas. Раздел сайта компании «Texas Instruments», посвященный процессору OMAP L138. — 2015. — URL: <http://www.ti.com/product/omap-l138> (online; accessed: 18.12.2015).
- [6] Matlab. Документация по S-функциям. — 2015. — URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/matlab-s-functions-1.html> (online; accessed: 18.12.2015).
- [7] Nelson Robert C. Flight stability and automatic control. — WCB/McGraw Hill New York, 1998. — Vol. 2.
- [8] Roskam J. Aircraft Flight Dynamics and Automatic Flight Controls, Parts I and II // DAR, Co., Lawrence, KS. — 1995.
- [9] Shuster Malcolm D. A survey of attitude representations // Navigation. — 1993. — Vol. 8, no. 9. — P. 439–517.
- [10] Spong Mark W, Hutchinson Seth, Vidyasagar Mathukumalli. Robot modeling and control. — wiley New York, 2006. — Vol. 3.

- [11] Wiesel William E. Spaceflight [Space flight] dynamics.— Tata McGraw-Hill Education, 1989.
- [12] Амелин К.С. Метод ориентирования сверхлегкого БПЛА при редком обновлении данных о его местоположении.— // Стохастическая оптимизация в информатике. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2014.
- [13] Калитеевский В.Н. Метод коммуникации в децентрализованной сети автономной группы мобильных роботов.— // Стохастическая оптимизация в информатике. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2014.
- [14] ТРИК. Сайт компании «ТРИК».— 2015.— URL: <http://www.trikset.com/> (дата обращения: 18.12.2015).